

METABOLISMO HÍDRICO DE LA INFRAESTRUCTURA VERDE DEL ÁREA METROPOLITANA DE BARCELONA

SUMARI

1. Introducción

2. Metodología

2.1. Caso de estudio

2.2. Aproximación «bottom-up»: estimación de los requerimientos hídricos de la vegetación

2.3. Aproximación «top-down»: análisis multiescalar del metabolismo hídrico

3. Resultados

3.1. Requerimientos hídricos de la vegetación

3.2. Flujos de agua a nivel de Área Metropolitana

3.3. Metabolismo hídrico de la infraestructura verde

3.4. Territorialización del metabolismo hídrico

4. Discusión

5. Conclusiones

6. Referencias

METABOLISMO HÍDRICO DE LA INFRAESTRUCTURA VERDE DEL ÁREA METROPOLITANA DE BARCELONA

1. Introducción

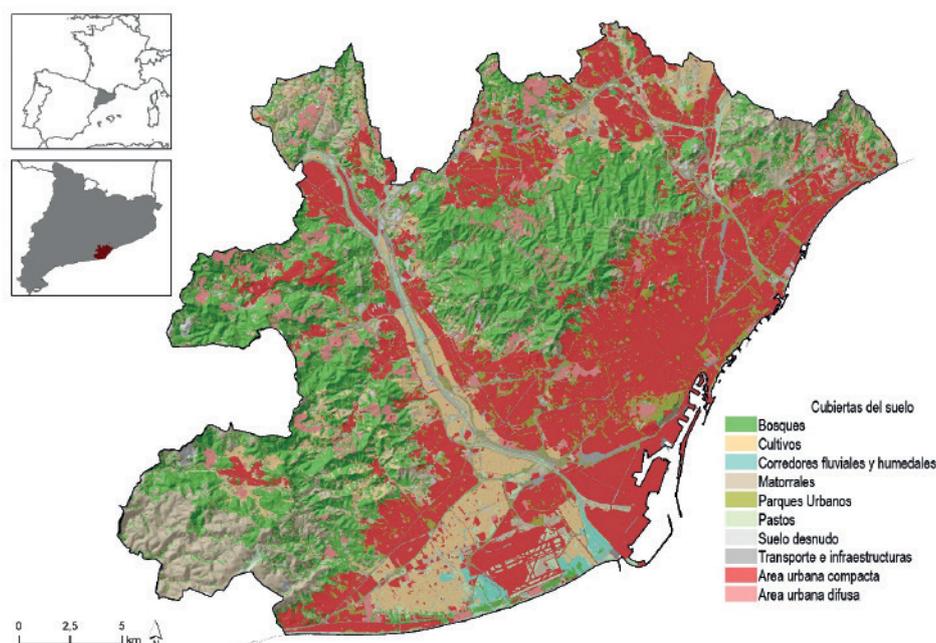
El análisis y la gestión de recursos naturales como el agua requieren de una aproximación integrada que permita la comprensión de todos los desafíos e implicaciones que tiene un sistema tan complejo como el hídrico, con efectos en las esferas ambientales, económicas, políticas y sociales (Bouwer, 2000; Pahl-Wostl et al., 2008; Weitz et al., 2014; Hagemann y Kirschke, 2017). Tradicionalmente, los recursos hídricos han sido tratados de forma compartimentada en enfoques monodisciplinares y políticas sectoriales que se enfocaban fundamentalmente en la gestión de la oferta, sin integrar la gestión de la demanda ni incidir en ella (Sharma, 2009; Chen et al., 2005). La concepción integrada del metabolismo del agua requiere identificar, estructurar y caracterizar toda la red de elementos relevantes a lo largo de las múltiples etapas del sistema hídrico, así como establecer cuantitativamente las interrelaciones, que en sistemas complejos son recíprocas y a menudo no lineales.

En general, los sistemas urbanos concentran las funciones metabólicas de las sociedades en relación al procesamiento y el consumo, mientras que externalizan las actividades primarias y, por lo tanto, dependen de estas funciones extractivas externas (Kennedy et al., 2015; Grimm et al., 2008; Rickwood et al., 2008). Incluso en el caso de que algunas ciudades produzcan algo de sus propios recursos hídricos, energéticos o alimentarios, el espacio físico en las áreas urbanas es muy limitado, y por lo tanto la competencia por otros usos del suelo es elevada y, en general, se da preferencia a los que generen más valor monetario por superficie ocupada. El salto de escala de núcleos urbanos a sistemas metropolitanos supone otro paradigma desde el punto de vista metabólico. Las metrópolis son un caso particular de sistema urbano con dinámicas muy interesantes de uso de los recursos (van den Brandeler et al., 2019). Se trata de territorios más extensos, donde se conectan múltiples núcleos urbanos dentro de una matriz territorial y, por lo tanto, existe el potencial de integrar una combinación de usos del suelo aparte de las áreas puramente urbanas, para así incrementar su provisión de servicios ecosistémicos. En este sentido, las áreas metropolitanas suponen una escala funcional que proporciona una gran oportunidad para la mejora de la gestión integral del agua.

La aproximación del metabolismo social evalúa de forma integrada el funcionamiento de sistemas socioecológicos, centrándose en el análisis de los flujos biofísicos y la estructura socioeconómica del sistema. El desarrollo del concepto de metabolismo social (Lotka, 1922) ha resultado en diferentes enfoques de cuantificación biofísica (Gerber y Scheidel, 2018). Para este estudio, nos basamos en la aproximación MuSIASEM, particularmente útil en el análisis multiescalar y multidimensional, el cual ha sido aplicado a numerosos casos de estudio (p.e., Sorman et al., 2009; Siciliano, 2012; Giampietro et al., 2014). Los estudios previos basados en la aproximación MuSIASEM han sido principalmente aplicados a las evaluaciones de sistemas agrícolas, tanto para la cuantificación y la caracterización de los flujos hídricos (Serrano-Tovar et al., 2014) como para las evaluaciones del metabolismo hídrico y sus impactos (Cabello y Madrid, 2014; Madrid et al., 2014; Salmoral et al., 2018). Estos estudios se centran en el análisis de la relevancia del agua para mantener un sector económico (p.e., agricultura) y una función social (p.e., producción de alimentos). Utilizamos, por lo tanto, la aproximación MuSIASEM para identificar y cuantificar los flujos hídricos en el sistema socioecológico metropolitano con datos estadísticos desde arriba (aproximación «top-down») y asignar los usos del agua a los diferentes sectores y niveles relevantes, estableciendo las interrelaciones en forma de intercambios de flujos de agua.

En cualquier sistema socioecológico, el agua es un recurso necesario para realizar muchas funciones sociales y económicas, así como funciones ecológicas fundamentales para la reproducción de las condiciones que permiten mantener la biota en los ecosistemas y la producción primaria de cultivos y ganado. Por otro lado, la extracción, distribución y consumo de agua requiere importantes inversiones económicas en infraestructuras apropiadas para la captura, tratamiento, distribución y saneamiento de los diferentes usos hídricos. A pesar de que el agua es un tema extensamente estudiado desde varias disciplinas, como la hidrología o la agronomía, y está siendo cada vez más considerada en los estudios de planeamiento urbano, resulta todavía la dimensión menos evaluada sistemáticamente en los análisis de metabolismo social (Eurostat, 2013). Parte de este vacío es debido a problemas en la disparidad de la información (Naff, 1999), que dificulta la construcción de bases de datos robustas que cubran todos los flujos de agua en ciudades

Figura 1. Mapas de cubiertas del suelo (2015) del Área Metropolitana de Barcelona (AMB).



Fuente: CREA (2016).

en general, y para la infraestructura verde en particular. Avanzar en este campo es, por lo tanto, crucial para el progreso sostenible del Área Metropolitana de Barcelona, especialmente en escenarios de cambio climático, donde el agua es un factor particularmente crítico en el contexto mediterráneo (TICCC, 2016).

Por otro lado, los diferentes patrones metabólicos configuran paisajes particulares que a su vez proveen de servicios ecosistémicos a las áreas metropolitanas. En este caso, los métodos procedentes de la ecología del paisaje nos son útiles para identificar patrones de usos del suelo y los procesos ecológicos asociados (Dupras et al., 2016; Marull et al., 2018a). La combinación del metabolismo social con la ecología del paisaje tiene la capacidad de generar indicadores territorializados de gran utilidad en el planeamiento, representados espacialmente en mapas utilizando herramientas SIG (Marull et al., 2016; Marull et al., 2018b). La aplicación de estos innovadores enfoques en el Área Metropolitana de Barcelona se presenta como una de las primeras caracterizaciones multiescalares de este tipo, dado que a pesar de los numerosos estudios que se han realizado en la zona sobre el uso del agua (p.e., March y Saurí, 2010; Domene et al., 2006), ninguno se ha centrado en sistematizar el análisis del agua en la infraestructura verde metropolitana. El presente estudio trata de llenar este vacío incorporando los flujos y el balance hídrico considerando los espacios naturales, así como integrándolos en una visión sistémica y a múltiples escalas que permita caracterizar el metabolismo hídrico de una forma integrada.

Este artículo se enfoca en dar respuesta a dos cuestiones principales: a) Cómo evaluar de forma integral los requerimientos de agua de la infraestructura verde en una región metropolitana; b) Cuáles serían las implicaciones potenciales de modificar la extensión y la disposición de los componentes de la infraestructura verde metropolitana (p.e., parques urbanos, áreas forestales y agrícolas) debido a cambios en los usos del

suelo (p.e., desarrollo urbano). Para ello, nuestra pregunta de investigación se centra en cómo caracterizar los diferentes elementos relevantes de un sistema hídrico tan complejo como el del Área Metropolitana de Barcelona para conseguir una representación analítica útil en la elaboración de políticas públicas.

2. Metodología

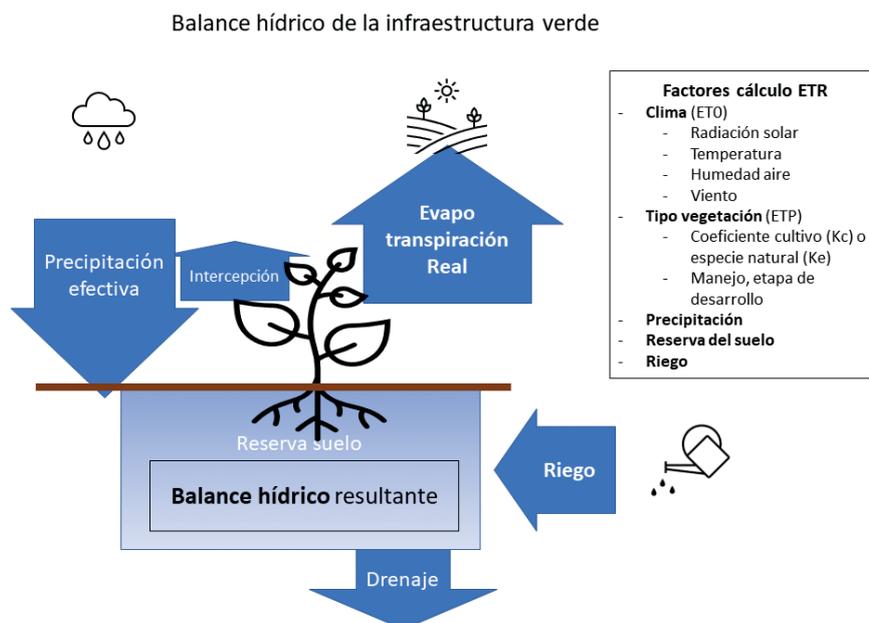
2.1. Caso de estudio

El Área Metropolitana de Barcelona (AMB) se compone de 36 municipios, se extiende por 636 km² y acoge a más de 3,3 millones de habitantes. Aproximadamente la mitad de la superficie de la metrópolis está urbanizada (48%), pero el resto de la superficie está compuesto por áreas agrícolas, principalmente en el delta del Llobregat, y por zonas montañosas que hospedan diversos hábitats naturales y usos rurales (Figura 1). La precipitación media anual es de 642 mm, teniendo un rango de 376-862 mm, con un patrón claro de precipitación máxima en otoño y en primavera, y con veranos secos (Ninyerola et al., 2000). El clima es mediterráneo de costa, con alto estrés hídrico en verano.

2.2. Aproximación «bottom-up»: estimación de los requerimientos hídricos de la vegetación

Dado que la infraestructura verde se caracteriza físicamente por estar cubierta de vegetación (plantas silvestres en hábitats naturales, hierba y plantas ornamentales en parques y bosques, o cultivos en espacios agrícolas), este estudio propone en primera instancia utilizar las estimaciones de consumo de agua basadas en los modelos de requerimientos hídricos empleados en agronomía. Para ello se utiliza una aproximación de abajo hacia arriba («bottom-up»), donde se hace una estimación desde los tipos de cultivos y especies vegetales predominantes hasta el balance hídrico del agua en los suelos. Todos los cálculos tienen como referencia datos del año 2015, a menos que se indi-

Figura 2. Diagrama con los principales elementos en el balance hídrico de la infraestructura verde.



que lo contrario. Como se observa en la Figura 2, los factores considerados para este tipo de estimación son: clima, vegetación, precipitación efectiva, reserva de agua del suelo, riego y drenaje.

En primer lugar, se generan mapas para todo el AMB con los datos climáticos de 2015 dados por la precipitación observada, la temperatura media y la evapotranspiración de referencia (ET0) de las estaciones meteorológicas, disponibles a nivel mensual. Todos los datos climáticos provienen del Servei Meteorològic de Catalunya (SMC). Se elabora un mapa de polígonos Thiessen, donde se infieren los datos de las estaciones de ET0 y temperatura. La ET0 está basada en la fórmula de Penman-Monteith, que incluye factores de radiación solar, temperatura, humedad del aire y viento. Para los datos de precipitación, se genera un mapa ráster mensual mediante el método IDW (*Inverse Distance Weighted*).

Una vez establecidos los factores climáticos, se calcula la evapotranspiración potencial (ETP), que equivaldría a la demanda teórica de las plantas en condiciones ideales. Esta evapotranspiración depende del consumo de cada planta, y por lo tanto es diferente para cada una de las cubiertas vegetales, que obtenemos con el *Mapa de Cubiertas del Suelo de Catalunya* de 2015 (CREAF, 2016). Los *coeficientes de cultivo* (Kc) se obtienen de la FAO (Allen et al., 1998). Se ajustan los diferentes períodos de desarrollo de cada cultivo a lo largo del año con datos de la FAO y con los períodos de siembra de las variedades típicas en la región (Calendari de Sembrar i Plantació, 2015).

Este estudio utiliza modelos de necesidades de riego para estimar los requerimientos hídricos de zonas verdes naturales y parques urbanos, estimando la evapotranspiración de las especies dominantes que existen en cada caso con datos del *Manual dels Hàbitats de Catalunya* (Carreras et al., 2016), y el mapa de cubiertas antes mencionado. Los *coeficientes de especie* (Ke) para la vegetación se obtuvieron del *Manual de*

Riego de Jardines (Ávila, 2004). Combinando los datos climáticos y de vegetación existente, se obtiene la evapotranspiración potencial (ETP), que sería la que habría si la reserva de agua del suelo estuviese completamente llena durante todo el año.

Sin embargo, se puede ir más allá de la ETP estimando la evapotranspiración real (ETR), teniendo en cuenta la precipitación que hubo, el balance de la reserva de agua del suelo y el riego que se produzca en cultivos irrigados. También se estima el drenaje resultante que sale de la infraestructura verde hacia otros elementos del sistema metropolitano. Para ello se calcula la intercepción, que descuenta la precipitación que se retiene en las hojas y ramas y no llega a caer al suelo antes de evaporarse: de un 35% en bosques de coníferas, de un 25% en el resto de vegetación leñosa y de un 10% en cultivos herbáceos (Vicente et al., 2018).

La precipitación que sí llega al suelo la denominamos precipitación efectiva. El proceso de intercepción supone ajustar la evapotranspiración potencial, que se denominará evapotranspiración potencial corregida (ETP_c). El cálculo de la variación de la reserva de agua del suelo en cada momento del año es un proceso complicado, que depende de establecer mes a mes si existe déficit o excedente de precipitación. Para el caso de los cultivos de regadío, entra también el factor riego, en el que se asume que siempre se satisfará toda el agua que requiera el cultivo. Por último, se puede obtener la cantidad de drenaje restante, que es el sobrante de las entradas de agua (precipitación y riego) que excedan la capacidad de reserva de los suelos.

Se puede acceder en línea a una explicación detallada sobre todos los cálculos efectuados, en el informe del Laboratorio Metropolitano de Ecología y Territorio de Barcelona (<https://iermb.uab.cat/let/>), denominado *Support a l'avaluació d'escenaris del Pla Director Urbanístic. Cap a una transició socioecològica de la infraestructura verda* (IERMB, 2021).

2.3. Aproximación «top-down»: análisis multiescalar del metabolismo hídrico

Para analizar el metabolismo hídrico de un sistema es necesario conocer el contexto con el que interactúa. Ello permite entender y cuantificar los flujos de entrada y salida, así como sus afectaciones mutuas a diferentes escalas. En nuestro caso, la escala principal de análisis es la infraestructura verde, mientras que el resto del Área Metropolitana y los sistemas de suministro externos representan escalas mayores de interacción con la infraestructura verde. En esta sección mostramos cómo funcionan los flujos de agua a nivel del Área Metropolitana para así saltar de nivel en una aproximación multiescalar.

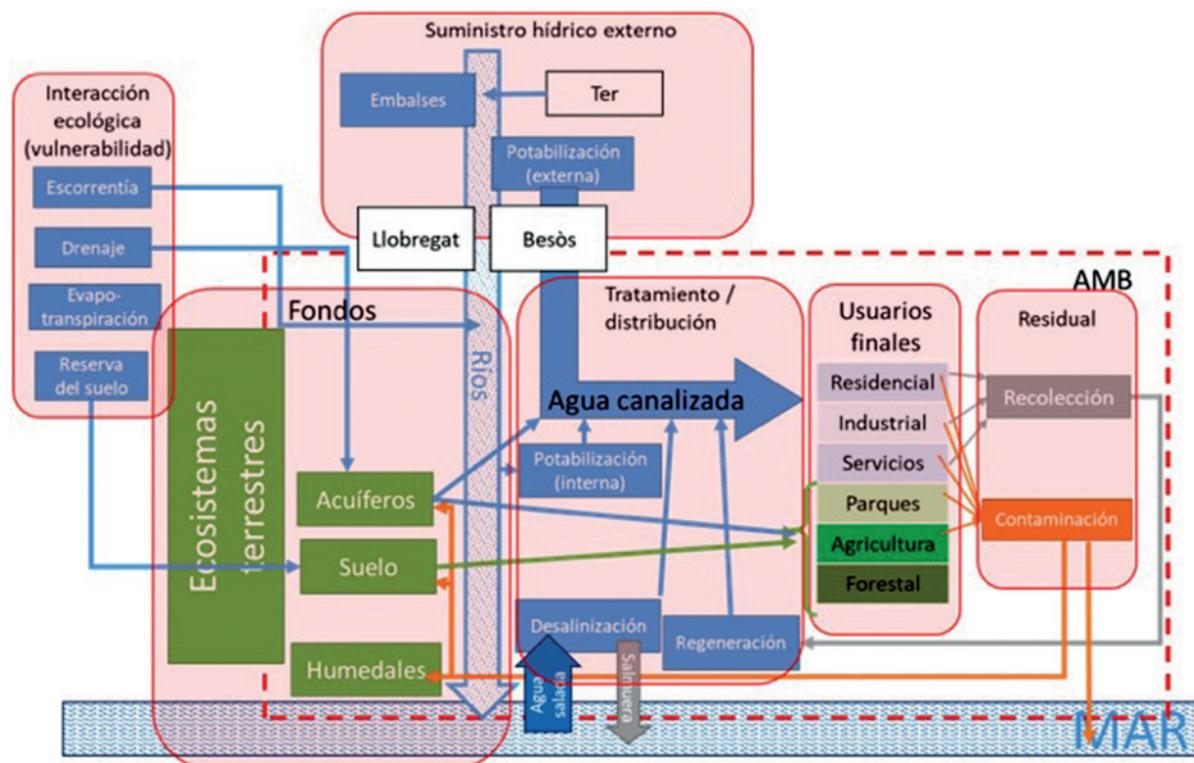
Como se mencionaba en la introducción, en este estudio empleamos el Análisis Integrado Multiescala del Metabolismo de la Sociedades y los Ecosistemas (MuSIASEM, por sus siglas en inglés) (Giampietro y Mayumi, 2000, 2001) para establecer cómo se usa el agua a través de todos los compartimentos de un sistema socioecológico. En particular, utilizamos la aplicación específica del metabolismo hídrico (Madrid et al., 2013) para estructurar los flujos de agua. A partir de diversos informes publicados recientemente (AMB, 2019; Servei de Redacció del Pla Director, 2017 y 2019) se han obtenido datos «top-down» para el flujo de agua del Área Metropolitana de Barcelona.

En el MuSIASEM, la cuantificación del agua se realiza en primer lugar clasificando en una serie de categorías semánticas los usos del agua a través del ciclo del agua, donde se identifican las etapas por las que pasan los flujos según los sectores del sistema socioecológico analizado. En este sentido, es importante distinguir entre las categorías de *agua azul* (agua apropiada por los humanos y usada directamente) y *agua verde* (el

agua en forma de humedad en el suelo que solo pueden usar las plantas y, por lo tanto, no puede ser usada directamente por los humanos). La Figura 3 muestra un diagrama de flujo que representa los elementos conceptuales relevantes en el metabolismo hídrico del Área Metropolitana de Barcelona y sus interacciones: a) Sistemas externos que suministran flujos de agua; b) Elementos fondo hídricos, los cuales habría que preservar para mantener el funcionamiento del sistema; c) Procesos ecológicos ligados a los ecosistemas que proveen agua y que representan los posibles elementos de vulnerabilidad si son afectados; d) Procesos intermedios de tratamiento y distribución de agua (que requieren de recursos para funcionar); e) Sectores socioeconómicos principales, que representan a los usuarios finales de los flujos analizados; f) Procesos que retroalimentan y cierran los ciclos en el sistema. También se clasifican todas las posibles fuentes de agua para el Área Metropolitana de Barcelona, lo que permite distinguir las importaciones externas de los recursos disponibles dentro del propio sistema.

Existen algunos procesos, como el tratamiento de agua potable, que ocurren tanto dentro como fuera del AMB, y hay procesos, como la desalinización o la depuración de aguas residuales, que ocurren solamente dentro del AMB. El Área Metropolitana de Barcelona importa una gran proporción del agua que consume desde sistemas fluviales externos, como el Llobregat o el Ter, y por tanto el consumo de este agua afecta a esos territorios externos con una enorme impronta (Tello y Ostos, 2011). En consecuencia, el agua consumida en el AMB tiene un gran nivel de dependencia del funcionamiento de estos sistemas fluviales. Sin embargo, el AMB tiene acuíferos, que junto con el suelo o ciertos hábitats naturales ejercen de fuentes internas de agua, las cuales deberían preservarse como fondos ecológicos para mantener la

Figura 3. Diagrama de flujos y fondos del agua indicando los orígenes y las relaciones entre compartimentos



capacidad de suministro. Finalmente, el agua residual puede ser reciclada o desechada después de su uso por los diferentes sectores socioeconómicos (usuarios finales). Estos flujos de agua se pueden verter sobre los ecosistemas o al mar generando potencialmente ciertos impactos ambientales (como las aguas residuales industriales), o pueden ser procesados por plantas depuradoras para su reutilización.

3. Resultados

3.1. Requerimientos hídricos de la vegetación

En la Figura 4 observamos el mapa resultante fruto de los modelos usados de agronomía e hidrología para estimar la evapotranspiración real (ETR), la cual representa una estimación del consumo de agua de la biomasa vegetal que conforma la infraestructura verde metropolitana. Esta es una estimación razonable, ya que modeliza todos los aspectos mencionados sobre clima, vegetación, precipitación efectiva, reserva del suelo, riego y drenaje para los cultivos, hábitats naturales y parques urbanos.

El mapa de la Figura 4 muestra en detalle las diferencias cuantitativas en el uso de agua de las diferentes cubiertas del suelo con vegetación, dependiendo de donde se ubican en el territorio. Podemos observar que, en general, las áreas agrícolas requieren bastante más agua por unidad de superficie que los hábitats naturales en el AMB. Esto se puede ver en las zonas de cultivos con alta demanda de agua, como en el delta del Llobregat, donde el agua superficial y la subterránea son fácilmente accesibles para la irrigación. La vegetación natural del AMB está en general bien adaptada a la escasez de agua propia del clima mediterráneo, puesto que los bosques, matorrales y pra-

dos están principalmente compuestos de especies esclerófilas o plantas estacionales oportunistas que aparecen en los períodos de más lluvia (sobre todo en otoño y primavera). En el mapa también podemos ver las diferencias en las zonas donde hay bosques de ribera o humedales, cuya vegetación utiliza mucha más agua por el acceso al nivel freático. Por otro lado, también se puede observar cómo los parques urbanos tienen en general un consumo más alto que el resto de la infraestructura verde, debido a la presencia de césped y ciertas plantas ornamentales. Justo por esta razón, la gestión de los parques de este territorio está actualmente implementando una gestión más eficiente del agua, como la promoción de especies autóctonas que requieren menos riego (AMB, 2018). Por último, en el mapa se observa cómo algunos cultivos permanentes, como los árboles frutales, tienden a utilizar más agua al cabo del año que las variedades anuales, que parte del año no requieren agua ni ocupan tierras al tratarse de cultivos estacionales. Algunos tipos de cereales, cultivos forrajeros y hortalizas tienen más de una cosecha al año y, por lo tanto, se observan copando las zonas púrpura del mapa por la mayor demanda de agua en esas parcelas.

3.2. Flujos de agua a nivel de Área Metropolitana

La Figura 5 pasa de la representación semántica de la Figura 3, mostrada en la metodología, a los resultados que ya cuantifican y muestran la distribución de los flujos de agua en el AMB. Asimismo, se categoriza el agua por su fuente de origen (sea superficial o subterránea), y se distingue entre *agua azul* (directamente apropiada para la sociedad), *agua verde* (el agua de la humedad del suelo, que solo pueden aprovechar las plantas) y *agua gris* (que corresponde a las aguas residuales).

Figura 4. Mapa del requerimiento hídrico anual de la infraestructura verde del Área Metropolitana de Barcelona (AMB), dado por la Evapotranspiración Real (ETR).

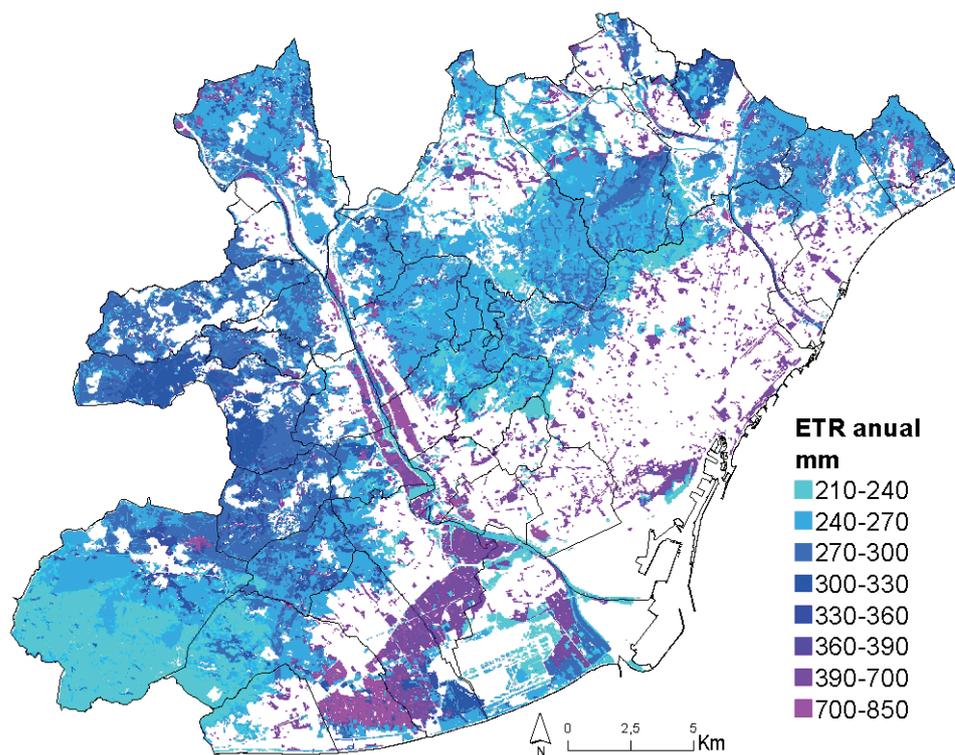
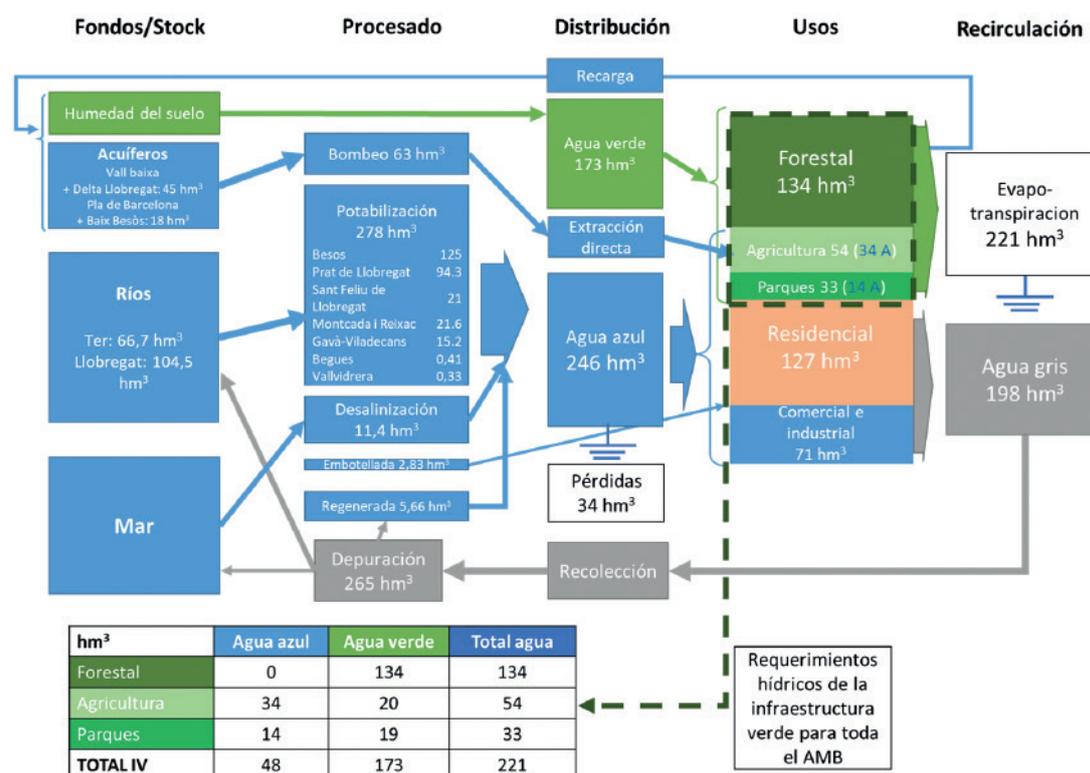


Figura 5. Flujos de agua en el Área Metropolitana de Barcelona (AMB).



Mientras que la mayoría del suministro de agua potable para el uso urbano proviene de dos sistemas externos principales (ríos Ter y Llobregat, con aproximadamente el 60% del suministro), también existen flujos importantes de agua que se obtienen desde dentro del territorio metropolitano. En concreto, se obtiene agua de los acuíferos internos, de la precipitación, del mar (a través de la desalinizadora del Llobregat), de algunos pequeños arroyos internos, e incluso de aguas regeneradas (reutilizadas). A pesar de que esta combinación de fuentes supone un gran nivel de complejidad en la gestión de los sistemas de suministro, tal diversificación tiene el potencial de generar oportunidades de usos alternativos y de incrementar la resiliencia del territorio, dada la actual gran dependencia de recursos hídricos externos y el consecuente impacto que genera en otros territorios esta alta demanda del AMB.

Respecto a la parte de agua azul, el sector residencial consume la mayor parte (52%), comparado con sectores productivos como el agrario (14%) o el comercial e industrial (29%). Esto supone un patrón diferente al observado para el resto de Cataluña, donde existe un nivel promedio de consumo residencial del 19% y el agrario aumenta hasta el 70% (ACA, 2008). Sin embargo, si también se considera el agua verde utilizada por la vegetación, lo que se considera necesario dadas las funciones y servicios que proporcionan, la imagen cambia radicalmente y resulta que la infraestructura verde se convierte en el mayor consumidor de agua en la metrópolis (41%), debido a la gran extensión de estos usos del suelo en el AMB (bosques, matorrales, prados y otros usos no agrícolas) y a sus requerimientos hídricos asociados (vistos en la sección anterior). Las explotaciones agrarias y los parques urbanos consumen tanto agua verde como agua azul al estar algu-

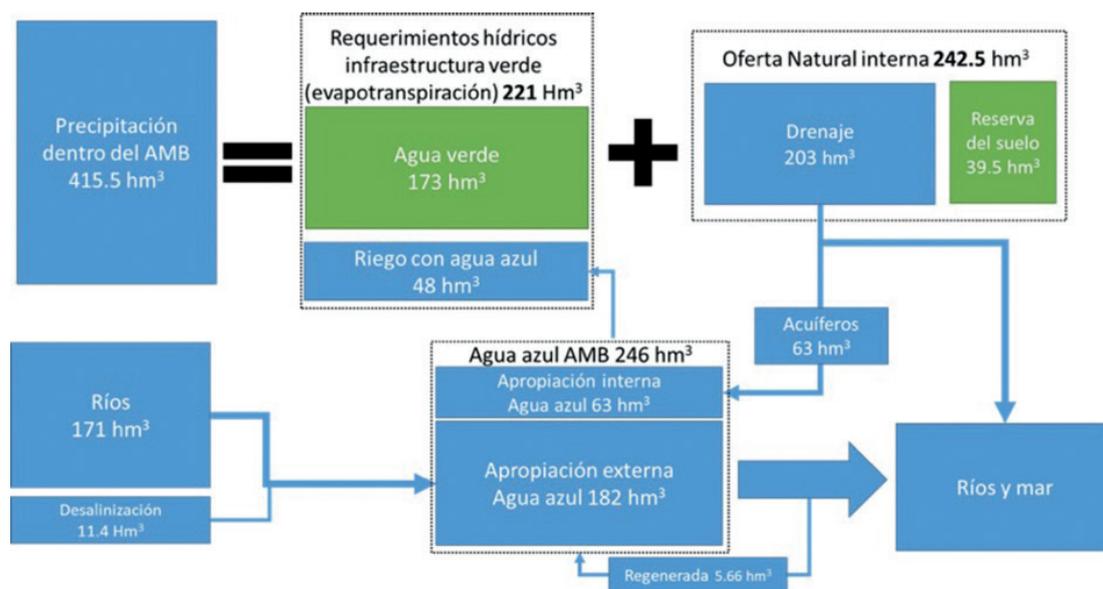
nos de ellos irrigados, pero no suponen un área tan grande como la de los hábitats naturales, por lo que en términos absolutos no representan tanto consumo de agua como los demás sectores.

Esta imagen general de los flujos y fondos del agua en el AMB supone la base para entender el metabolismo hídrico tal y como proponemos para analizar los sistemas metropolitanos. Cuando se incluyen las partes más relevantes del sistema hídrico por lo que respecta a sus usos del agua, esta representación cuantitativa permite estudiar balances en el territorio y contextualizar las políticas públicas, así como obtener y discutir un presupuesto biofísico de los recursos considerando dónde y quién utiliza el agua, para qué y en qué cantidades. De esta forma, y como desarrollamos en los siguientes apartados, se pueden evaluar y ofrecer indicadores sobre el funcionamiento del metabolismo hídrico de la infraestructura verde metropolitana desde una perspectiva sistémica y territorial.

3.3. Metabolismo hídrico de la infraestructura verde

Este nivel de análisis se centra en evaluar la distribución de los usos del agua en la infraestructura verde del sistema metropolitano. En la parte inferior de la **Figura 5** se muestra la cantidad de agua utilizada en los tres subsectores seleccionados de la infraestructura verde en el AMB: forestal (134 Hm³), agrario (54 Hm³) y parques urbanos (33 Hm³). Mientras que la agricultura y los parques utilizan irrigación en algunos casos (agua azul), el resto de la infraestructura verde no usa agua azul, lo que implica que la satisfacción de los requerimientos hídricos de estas áreas depende totalmente de la precipitación natural. Sin embargo, su gran consumo de agua verde sí tiene implicaciones importantes para el balance general del AMB, ya que

Figura 6. Oferta natural y apropiación de agua azul y verde en el Área Metropolitana de Barcelona (AMB).



afecta enormemente a la disponibilidad de agua restante.

Esto se analiza mejor en la Figura 6, la cual muestra un diagrama que representa el rol de la infraestructura verde en el suministro y apropiación de agua en la metrópolis. La oferta natural es agua que permanece en el sistema después de que ocurra el proceso de evapotranspiración de la vegetación. Este volumen sería el máximo teórico que la sociedad podría utilizar si tuviese la infraestructura necesaria, y es por lo que es clave cuantificar la evapotranspiración de la infraestructura verde en el territorio, como hemos hecho en los pasos anteriores. En el caso del AMB, la parte de la oferta natural que drena y recarga acuíferos se utiliza en gran medida para la explotación de agua subterránea para la irrigación de cultivos en el delta del Llobregat. La apropiación total de agua azul en el Área Metropolitana es una combinación de la oferta natural disponible interna (representa el 26% del total de agua azul), las importaciones de agua potable de sistemas fluviales externos (70%), y algo de desalinización que ocurre dentro del AMB (4%). Después, parte de

toda esta agua azul apropiada por la sociedad se usa para irrigar algunos cultivos y parques, por lo que la evapotranspiración total de la infraestructura verde es al final la suma de la precipitación y algo de agua azul aportada por la sociedad. Es interesante incidir en que, en el caso del AMB, se hacen esfuerzos para reciclar algo de las aguas grises provenientes de usos urbanos, depurarlas y utilizarlas para la irrigación (representando un 11,8% del total de agua azul usada para cultivos).

3.4. Territorialización del metabolismo hídrico

Gracias a los modelos empleados, basados en información cartográfica, es posible generar niveles de análisis georreferenciados a la carta. De esta forma, se abre la oportunidad de territorializar la información y no solo generar resultados globales donde no se puedan apreciar las complejas e interesantes heterogeneidades existentes dentro del territorio metropolitano. Por ejemplo, en la Figura 7 se puede ver, para cada uno de los 36 municipios del AMB, la diferente distribución de los volúmenes de requerimientos hídri-

Figura 7. Volúmenes de agua utilizada (hm³) por los sectores forestal, agrícola y parques en los 36 municipios del Área Metropolitana de Barcelona (AMB).

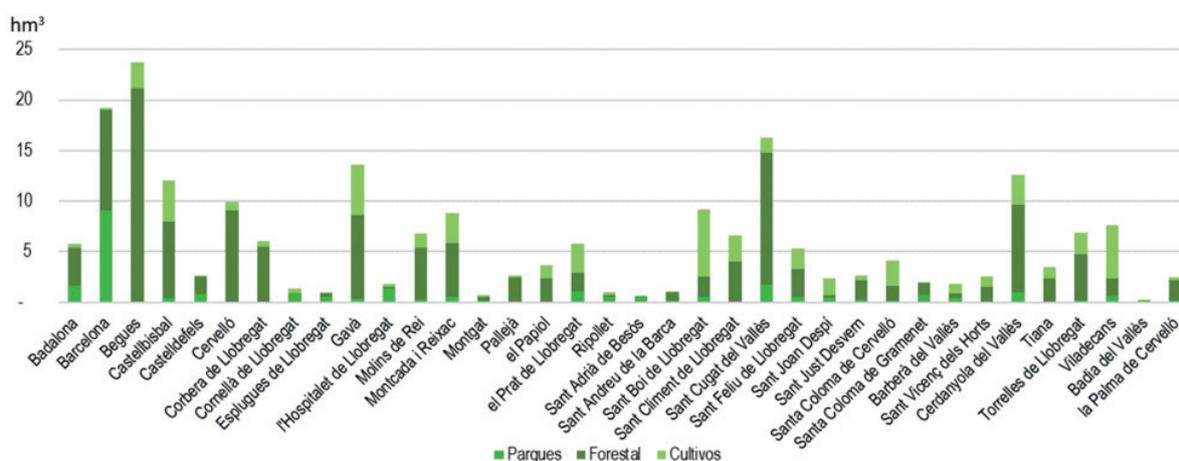
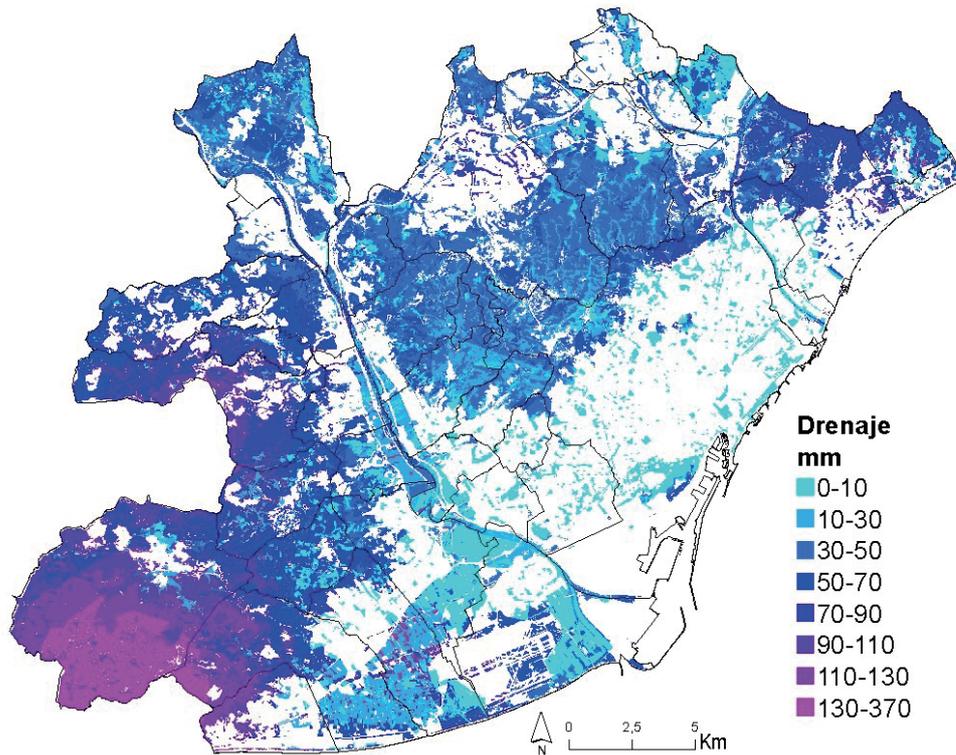


Figura 8. Drenaje resultante en la infraestructura verde del AMB.



cos de la vegetación para los 3 sectores considerados (forestal, agrícola y parques).

Otra importante aportación fruto de esta territorialización es el cálculo del drenaje. Es decir, el agua sobrante que ni el suelo ni la vegetación pueden absorber y fluye hacia los acuíferos y cuerpos de agua superficiales recargándolos. En la **Figura 8** mostramos el mapa de este drenaje, después de hacer el balance entre la precipitación efectiva y riego, la evapotranspiración real y la reserva del suelo.

Como se puede observar en la **Figura 8**, las cubiertas del suelo con vegetación de alta demanda hídrica, como los cultivos de regadío en el Prat del Llobregat, son los que suelen drenar menos agua. Por otro lado, la poco frondosa vegetación arbustiva y herbácea de la zona del Massís del Garraf (extremo suroeste del mapa), es la que evapotranspira menos agua y drena más. También se puede observar en este mapa el detalle del gradiente concéntrico del efecto de las variables climáticas del modelo.

4. Discusión

La metodología propuesta proporciona una visión holística del funcionamiento del sistema hídrico, incluyendo información georreferenciada muy detallada a nivel espacial sobre los requerimientos hídricos de la vegetación en las diferentes cubiertas. Esta cualidad permite representar y estimar de forma territorialmente muy precisa cómo los posibles cambios de usos del suelo planteados por el planeamiento territorial van a derivar en cambios en los flujos de agua en el sistema, y distinguir dónde se producen los cambios. Lo que es importante resaltar de esta aproximación es que la combinación de metodologías «bottom-up» de los cál-

culos de la evapotranspiración cuadra con las cifras obtenidas desde los datos de distribución de agua de la visión «top-down», lo cual otorga una robustez cuantitativa muy relevante a toda la aproximación, y la válida para su uso en el desarrollo de políticas públicas en el AMB.

En este sentido, la información resultante ofrece datos del metabolismo hídrico de la metrópolis a diferentes niveles de análisis que resultan clave en la toma de decisiones técnicas y políticas. En primer lugar, se cuantifican los diferentes volúmenes de agua y la distribución en los diversos componentes y sectores, lo cual permite tener una idea general de contexto que refleja el rol y la importancia de cada elemento en el sistema. En segundo lugar, se establece el nivel de apertura, dependencia externa y autosuficiencia del territorio respecto a los recursos hídricos. En tercer lugar, se evalúan las posibles pérdidas del sistema hídrico, de forma que se identifica una eficiencia en el uso y distribución del agua para cada uso final. En cuarto lugar, al estar todos los elementos relacionados cuantitativamente, se puede discernir cuáles son los posibles compromisos o sinergias entre los elementos del sistema hídrico, de forma que se pueden simular escenarios donde se observe cómo variaciones en uno de los elementos afectan al resto del sistema. Finalmente, al conectar diferentes elementos del sistema hídrico con diversas fuentes de datos, se pueden comprobar inconsistencias o corregir falta de datos entre niveles de análisis.

En general, y gracias a los resultados territorializados obtenidos para el AMB, es posible anticipar y cuantificar que, por ejemplo, el caso de un cambio de usos del suelo de áreas naturales hacia áreas agrícolas implicaría más o menos requerimientos hídricos depen-

diendo de la combinación de cultivos empleada. Los indicadores de esta aproximación permiten estimar muy en detalle las implicaciones de estos cambios sobre el consumo de agua de la infraestructura verde y la disponibilidad resultante para otros usos. Este aspecto es especialmente relevante para evaluar escenarios como, por ejemplo, los del Plan Director Urbanístico (PDU) del AMB, que han sugerido que la biodiversidad se incrementaría recuperando algunas tierras para la agricultura, mejor que extendiendo los bosques (Padró et al., 2020; Marull, 2021). Este tipo de información es muy útil para evaluar escenarios prometedores como los que incrementan el nivel de agua regenerada o el uso de prácticas agroecológicas en el territorio, que podrían potencialmente significar una mejor gestión del sector agrario en la metrópolis. Por último, el modelo permite incorporar una nueva dimensión sobre el agua en la batería de indicadores que ya ofrece el SIA (Análisis Socioecológico Integrado), que desarrolla el Laboratorio Metropolitano de Ecología y Territorio de Barcelona (LET).

5. Conclusiones

Se analiza el sistema hídrico de la infraestructura verde del Área Metropolitana de Barcelona desde la perspectiva del metabolismo social, la cual muestra la distribución de los flujos de agua en el territorio metropolitano. La combinación con métodos procedentes de la agronomía y de la ecología del paisaje ha permitido analizar en detalle y a diferentes escalas el comportamiento del sistema hídrico en el territorio. Este tipo de análisis establece los fundamentos para evaluar el metabolismo metropolitano del agua en diferentes escenarios (desarrollo urbanístico, adaptación al cambio climático, etc.) donde los elementos clave están interrelacionados, de manera que se puede estimar cómo reacciona todo el sistema cuando alteramos algún elemento del mismo. En este sentido, la información generada en este trabajo puede ser muy útil para la gestión y planificación del territorio metropolitano, ya que identifica requerimientos, posibles limitaciones, oportunidades de recursos internos e implicaciones en los escenarios futuros que se quieran plantear. Por ejemplo, las metrópolis pueden ser capaces de producir en su territorio parte de la comida o energía que consume la sociedad, pero esto a su vez tiene implicaciones en el uso del agua, y con esta metodología se pueden cuantificar esos cambios. Los resultados obtenidos también permiten extraer indicadores para identificar limitaciones ambientales, establecer objetivos y/o valorar su cumplimiento en lo que respecta a la sostenibilidad, autosuficiencia de recursos, soberanía alimentaria, equidad social, competitividad económica o bienestar de la población. Esta propiedad permite informar una gobernabilidad transversal que contemple el territorio de forma multinivel, lo que resulta de gran utilidad en sistemas socioecológicos tan complejos como son las áreas metropolitanas.

6. Referencias

ACA - AGÈNCIA CATALANA DE L'AIGUA (2008). *L'aigua a Catalunya: Diagnosi i propostes d'actuació*. Barcelona: Departament de Medi Ambient i Habitatge.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. (1998). «Crop evapotranspiration-Guidelines for computing

crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56». *FAO*, Rome, 300(9):D05109.

AMB - ÀREA METROPOLITANA DE BARCELONA (2018). *Els parcs gestionats per l'AMB han reduït un 34% el consum d'aigua en 12 anys*. Recuperado de: <https://www.amb.cat/es/web/amb/actualitat/sala-de-premsa/notes-de-premsa/detall/-/notaprensa/els-parcs-gestionats-per-l-amb-han-reduit-un-34-el-consum-d-aigua-en-12/6703093/11696>

AMB - ÀREA METROPOLITANA DE BARCELONA (2019). *Dades ambientals 2014*. Recuperado de: <http://www.amb.cat/s/es/web/area-metropolitana/dades-estadistiques/medi-ambient/aigua.html>

ÁVILA, R. (2004). *Manual de riego de jardines*. Sevilla: Junta de Andalucía - Consejería de Agricultura y Pesca, pp. 233-246.

BOUWER, H. (2000). «Integrated water management: emerging issues and challenges». *Agricultural water management*, 45(3):217-228.

CABELLO, V.; MADRID, C. (2014). «Water use in arid rural systems and the integration of water and agricultural policies in Europe: the case of Andarax river basin». *Environment, Development and Sustainability*, 16(4):957-975.

CALENDARI DE SEMBRA I PLANTACIÓ (2015). Obtenido de: <http://hortsdeldelta.com/calendari-sembra/>

CARRERAS, J.; FERRÉ, A.; VIGO, J.; CAMBRA, J. J. (eds.) (2016). *Manual dels hàbitats de Catalunya: catàleg dels hàbitats naturals reconeguts en el territori català d'acord amb els criteris establerts pel «CORINE biotopes manual» de la Unió Europea*. Departament de Medi Ambient i Habitatge, Generalitat de Catalunya.

CHEN, Y.; ZHANG, D.; SUN, Y.; LIU, X.; WANG, N.; SAVENIJE, H. H. (2005). «Water demand management: A case study of the Heihe River Basin in China». *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 30(6-7):408-419.

CREAF - CENTRE DE RECERCA ECOLÒGICA I APLICACIONS FORESTALS (2016). *Mapa de Cobertes del Sòl de Catalunya de 2015*. <https://www.creaf.uab.es/mcsc/>

DEPIETRI, Y. (2015). *Ecosystem services in practice: well-being and vulnerability of two European urban areas* (Doctoral dissertation). Bellaterra: Universitat Autònoma de Barcelona.

DOMENE, E.; SAURÍ, D. (2006). «Urbanisation and water consumption: Influencing factors in the metropolitan region of Barcelona». *Urban Studies*, 43(9):1605-1623.

DTS - DEPARTAMENT DE TERRITORI I SOSTENIBILITAT, GENERALITAT DE CATALUNYA (2017). *Infraestructura Verda, Conceptes Clau*.

DUPRAS, J.; MARULL, J.; PARCERISAS, LL.; COLL, F.; GONZALEZ, A.; GIRARD, M.; TELLO, E. (2016). «The impacts of urban sprawl on ecological connectivity in the Montreal Metropolitan Region». *Environmental Science & Policy*, 58:61-73.

EUROSTAT (STATISTICAL OFFICE OF THE EUROPEAN UNION) (2013). *Economy-wide Material Flow Accounts (EW-MFA)*. Compilation Guide.

GERBER, J.F.; SCHEIDEL, A. (2018). «In search of substantive economics : comparing today's two major socio-metabolic approaches to the economy – MEFA and MuSIASEM». *Ecological Economics*, 144:186-194.

GIAMPIETRO, M.; MAYUMI, K. (2000). «Multiple-scale integrated assessment of societal metabolism: introducing the approach». *Population and Environment*, 22(2):109-153.

GIAMPIETRO, M.; MAYUMI, K.; BUKKENS, S. G. (2001). «Multiple-scale integrated assessment of societal metabolism: an analytical tool to study development and sustainability». *Environment, Development and Sustainability*, 3:275-307.

GIAMPIETRO, M.; ASPINALL, R. J.; RAMOS-MARTIN, J.; BUKKENS, S. G. (eds.). (2014). *Resource accounting for sustainability assessment: the nexus between energy, food, water and land use*. Routledge.

GRIMM, N. B.; FAETH, S. H.; GOLUBIEWSKI, N. E.; REDMAN, C. L.; WU, J.; BAI, X.; BRIGGS, J. M. (2008). «Global change and the ecology of cities». *Science*, 319(5864):756-760.

HAGEMANN, N.; KIRSCHKE, S. (2017). «Key issues of interdisciplinary NEXUS governance analyses: Lessons learned from research on integrated water resources management». *Resources*, 6(1):9.

HANSEN, R.; PAULEIT, S. (2014). «From multifunctionality to multiple ecosystem services? A conceptual framework for multifunctionality in green infrastructure planning for urban areas». *Ambio*, 43(4):516-529.

IERMB - Institut d'Estudis Regionals i Metropolitans de Barcelona (2021). *Suport a l'avaluació d'escenaris del Pla Director Urbanístic. Cap a una transició socio-ecològica de la infraestructura verda*. Recuperado de: <https://iermb.uab.cat/ca/recerca/estudis/sostenibilitat/>

KENNEDY, C. A.; STEWART, I.; FACCHINI, A.; CERSOSIMO, I.; MELE, R.; CHEN, B. ...; DUBEUX, C. (2015). «Energy and material flows of megacities». *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(19):5985-5990.

LOTKA, A. J. (1922). «Contribution to the energetics of evolution». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 8(6):147.

MADRID, C.; CABELLO, V.; GIAMPIETRO, M. (2013). «Water-use sustainability in socioecological systems: A multiscale integrated approach». *BioScience*, 63(1):14-24.

MARCH, H.; SAURÍ, D. (2010). «The suburbanization of water scarcity in the Barcelona metropolitan region: Sociodemographic and urban changes influencing domestic water consumption». *The Professional Geographer*, 62(1):32-45.

MARULL, J.; FONT, C.; PADRÓ, R.; TELLO, E.; PANAZZOLO, A. (2016). «Energy–Landscape Integrated Analysis: A proposal for measuring complexity in internal agro-

ecosystem processes (Barcelona Metropolitan Region, 1860-2000)». *Ecological Indicators*, 66:30-46.

MARULL, J.; CUNFER, G.; SYLVESTER, K.; TELLO, E. (2018a). «A landscape ecology assessment of land-use change on the Great Plains-Denver (CO, USA) metropolitan edge». *Regional Environmental Change*, 18:1765-1782.

MARULL, J.; TELLO, E.; BAGARIA, G.; FONT, X.; CATTANEO, C.; PINO, J. (2018b). «Exploring the links between social metabolism and biodiversity distribution across landscape gradients: A regional-scale contribution to the land-sharing versus land-sparing debate». *Science of the Total Environment*, 620:1272-1285.

MARULL, J.; PADRÓ, R.; CIRERA, J.; GIOCOLI, A.; PONS, M.; TELLO, E. (2021). «A Socioecological Integrated Analysis of the Barcelona Metropolitan Agricultural Landscapes». *Ecosystem Services*, 51:101350.

NINYEROLA, M.; PONS, X.; ROURE, J. M. (2000). «A methodological approach of climatological modelling of air temperature and precipitation through GIS techniques». *International Journal of Climatology*, 20:1823-1841.

NAFF, T. (ed.) (1999). *Data sharing for international water resource management: eastern Europe, Russia and the CIS* (Vol. 61). Springer Science & Business Media.

PAHL-WOSTL, C.; KABAT, P.; MÖLTGEN, J. (2008). «Adaptive and integrated water management». *Coping with Complexity and Uncertainty*. Berlín / Heidelberg.

PADRÓ, R.; LA ROTA-AGUILERA, M. J.; GIOCOLI, A.; CIRERA, J.; COLL, F.; PONS, M.; ... MARULL, J. (2020). «Assessing the sustainability of contrasting land use scenarios through the socioecological integrated analysis (SIA) of the metropolitan green infrastructure in Barcelona». *Landscape and urban planning*, 203:103905.

RICKWOOD, P.; GLAZEBROOK, G.; SEARLE, G. (2008). «Urban structure and energy — a review». *Urban policy and research*, 26(1):57-81.

SALMORAL, G.; KHATUN, K.; LLIVE, F.; LOPEZ, C. M. (2018). «Agricultural development in Ecuador: A compromise between water and food security?». *Journal of Cleaner Production*, 202:779-791.

SERRANO-TOVAR, T.; CADILLO-BENALCAZAR, Z.; DIAZ-MAURIN, F.; KOVACIK, Z.; MADRID-LÓPEZ, C.; GIAMPIETRO, M.; ASPINALL, R. J.; RAMOS-MARTIN, J.; BUKKENS, S. G. F. (2014). «The republic of Mauritius», en: GIAMPIETRO, M.; ASPINALL, R. J.; RAMOS-MARTIN, J.; AND SANDRA G.F. BUKKENS, S. G. F. (eds.). *Resource Accounting for Sustainability: The Nexus Between Energy, Food, Water and Land Use*, 163-180. Routledge Explorations in Sustainability and Governance.

SERVEI DE REDACCIÓ DEL PLA DIRECTOR (2017). *Metabolisme urbà i Serveis. Document de base per la Taula Temàtica en el marc del PDU*. Àrea Metropolitana de Barcelona.

SERVEI DE REDACCIÓ DEL PLA DIRECTOR (2019). *Quaderns PDU metropolitana. Directrius urbanístiques. Metabolisme Urbà*. Àrea Metropolitana de Barcelona.

SHARMA, S. K.; VAIRAVAMOORTHY, K. (2009). «Urban water demand management: prospects and challenges for the developing countries». *Water and Environment Journal*, 23(3):210-218.

SICILIANO, G. (2012). «Urbanization strategies, rural development and land use changes in China: A multiple-level integrated assessment». *Land Use Policy*, 29(1):165-178.

SORMAN, A.; GIAMPIETRO, M.; LOBO ALEU, A.; SERRANO-TOVAR, T. (2009). *Applications of the MuSIASEM approach to study changes in the metabolic pattern of Catalonia*. Working document. <http://www.recercat.net/handle/2072/40522>

TELLO, E.; OSTOS, J. R. (2011). «Water consumption in Barcelona and its regional environmental imprint: a long-term history (1717-2008)». *Regional Environmental Change*, 12(2):347-361.

TICCC (2016). *Tercer informe sobre el canvi climàtic a Catalunya*. ISBN 9788499653174 (IEC).

VAN DEN BRANDELER, F.; GUPTA, J.; HORDIJK, M. (2019). «Megacities and rivers: Scalar mismatches between urban water management and river basin management». *Journal of Hydrology*, 573:1067-1074.

VICENTE, E.; VILAGROSA, A.; RUIZ-YANETTI, S.; MANRIQUE-ALBA, À.; GONZÁLEZ-SANCHÍS, M.; MOUTAHIR, H.; CHIRINO, E.; DEL CAMPO, A.; BELLOT, J. (2018). «Water balance of Mediterranean *Quercus ilex* L. and *Pinus halepensis* mill. forests in semiarid climates: A review in a climate change context». *Forests*, 9:1-16.

WEITZ, N.; NILSSON, M.; DAVIS, M. (2014). «A nexus approach to the post-2015 agenda: Formulating integrated water, energy, and food SDGs». *SAIS Review of International Affairs*, 34(2):37-50.